

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 22 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2011

課題番号：22760209

研究課題名（和文）

リアルタイムシミュレータを用いた直流配電システムの模擬評価装置に関する研究

研究課題名（英文）

A Study on An Analysis Method of DC Microgrids using Real-time Simulation

研究代表者

柿ヶ野 浩明 (KAKIGANO HIROAKI)

大阪大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：30437371

研究成果の概要（和文）：

直流配電システムにおいて、実験用ミニモデルを拡張する方式としてリアルタイムシミュレータと双方向直流電源を用いる手法を提案し検討を行った。まず、高速応答可能な双方向直流電源を製作した。結果、5A の電流指令値のステップ変化に対し応答時間約 800 μ s を達成し、オーバーシュートなく指令値に追従できることを確認した。次に製作した双方向直流電源をリアルタイムシミュレータと実験用ミニモデルを接続し解析を行い提案手法の妥当性を示した。

研究成果の概要（英文）

We proposed an analysis method of dc microgrids using real-time simulation, which can extend a small experimental model virtually. We made a fast response bidirectional dc voltage source, and it accomplished that the response of the dc source was 800 μ s when there was step change in the current reference from 1 to 5 A. After that, the dc source was connected to a small experimental system and a real-time simulator. The experimental results demonstrated the validity of the proposed method.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,500,000	750,000	3,250,000

研究分野：電気工学

科研費の分科・細目：電気電子工学，電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：マイクログリッド，直流給電，リアルタイムシミュレーション，分散形電源

1. 研究開始当初の背景

(1) 太陽光発電などの自然エネルギー発電は出力変動が大きいことから予備力確保など電力供給側・需要家側双方での対策が必要であり、その対策としてマイクログリッド（自立可能な小規模電力供給システム）の研究が行われている。

(2) 太陽光発電や燃料電池などの分散形電源は直流出力である。蓄電池などのエネルギー貯蔵装置も直流出力であり、また多くの負荷は内部で直流に変換されている。よって、交流のマイクログリッドに対して、直配電を主たる配電方式とする DC マイクログリッドは

交直変換に伴う損失低減が期待できる。さらに、系統事故時にも瞬時電圧低下などのない高品質電力供給が可能な点が特長である。

(3) 一方、新しい電力システムの実用化には前段階として大規模な実証研究が必要不可欠であるが、コストやシステム構築後の仕様の変更が難しいなどといった問題がある。

2. 研究の目的

本研究では、リアルタイムシミュレーションを用いた DC マイクログリッドの解析手法を提案する。本手法は、リアルタイムシミュレータにより複数住戸の模擬を行い、高速応答双方向直流電源を用いて実験システムと接続する HILS (Hardware in the Loop Simulation) を用いるものである。これにより、DC マイクログリッド実験システムを仮想的に拡張することが可能となり、システム規模が大きくなった場合の配電電圧の安定性解析などを柔軟に行うことができる。本手法の特徴を明らかにするとともに、拡張システムを用いた安定性解析などを行うことが本研究の目的である。

3. 研究の方法

本研究で想定するシステムを図 1 に示す。研究室に構築している DC マイクログリッド実験用ミニモデルと、リアルタイムシミュレータによる模擬モデルを組み合わせた構成となっている。

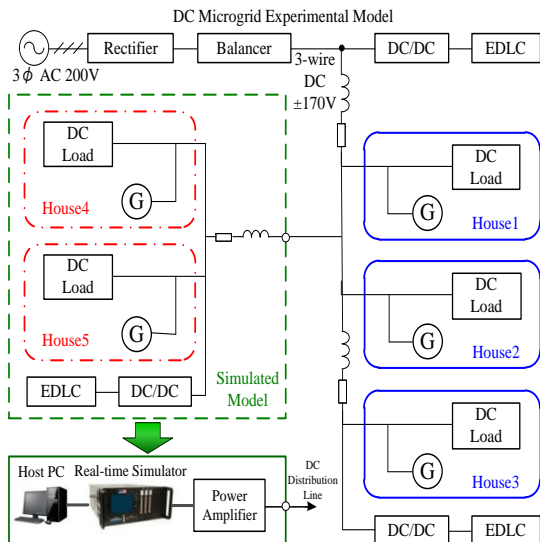


図 1 HILS を用いた実験システム

実験用ミニモデルの 3 住戸に加え、新たな住戸をリアルタイムシミュレータ、および実験システムとのインターフェースである双方向直流電源を用いて模擬する。リアルタイムシミュレータには RT-LAB を使い、住戸やエ

ネルギー貯蔵装置、配電線のモデリングは MATLAB/Simulink により行う。本システムを用いることによりシステム構成の変更を容易に行うことができ、全てを実機で構築したシステムに対して省スペースかつ柔軟な解析が可能となる。

HILS には、実験用ミニモデルとリアルタイムシミュレータを結びつけるアンプとしての電力回生機能付き直流電源が必要である。しかし、この直流電源に制御遅れがあるとリアルタイムシミュレーション自身に不安定性が生じる可能性がある。そこで本研究では、高速応答を特徴とした双方向直流電源の開発を行った。

上記直流電源の回路構成及び回路定数を図 2、表 1 にそれぞれ示す。本回路は双方向整流器、双方向チョッパ、および DC/DC コンバータにより構成されており、整流器においては直流電圧一定制御を行う。整流器の出力に双方向チョッパを用いて DC/DC コンバータの入力電圧を昇圧することにより、リアルタイムシミュレータと実験システムのインターフェースとなる DC/DC コンバータの高速応答性に寄与する。リアルタイムシミュレータの仮想モデルの演算によって与えられる電力指令値及び出力電圧のフィードバックにより、DC/DC コンバータの出力電流指令値を算出し、これを双方向直流電源より出力する。

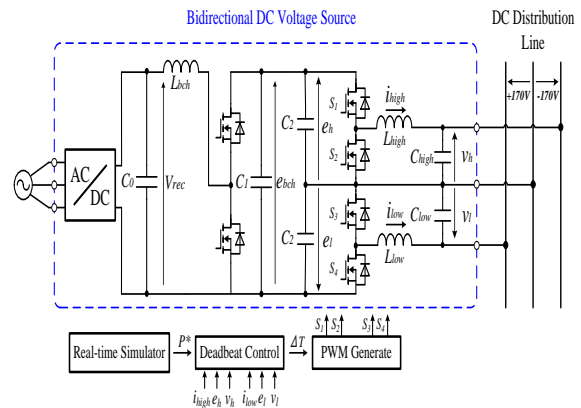


図 2 双方向直流電源の回路構成

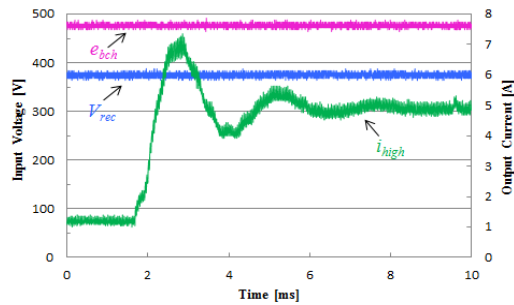
表 1 双方向直流電源の回路定数

C_0	6000 μ F	C_1	6000 μ F	$L_{high,low}$	5 mH	V_{rec}	380 V
L_{dch}	10 mH	C_2	6000 μ F	$C_{high,low}$	4.7 μ F	e_{dch}	500 V
Sampling frequency	15 kHz		f_{sw} of rectifier	15 kHz			
f_{sw} of chopper	15 kHz		f_{sw} of dc/dc converter	25 kHz			
f_{sw} : switching frequency							

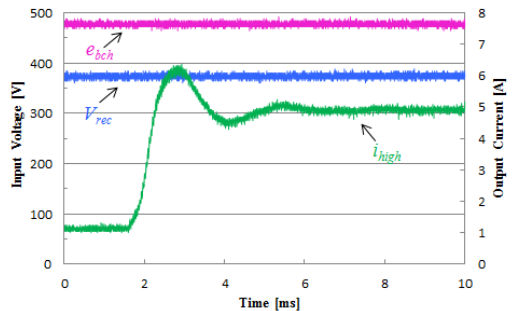
4. 研究成果

(1) 製作した双方向直流電源の制御応答性について評価を行うため、図 2 に示す回路にお

いて実験による動作確認を行った。ただし、直流電源の出力側には電子負荷装置を接続し定抵抗モードで使用した。サンプリング周波数は 15 kHz、DC/DC コンバータのスイッチング周波数は 25 kHz である。また、DC/DC コンバータの出力フィルタリアクトルが 1.5 mH、5 mH それぞれの場合について評価を行い、任意の時間において出力電流指令値を 1 A から 5 A へステップ的に変化させた。実験結果を図 3 に示す。図より、インダクタンスの違いにより電流波形のリプルに多少の差が見られるものの、応答速度に顕著な相違は見られず応答時間約 800 μ s を達成した。以降の実験では電流リプルの低減を優先し 5 mH のリアクトルを用いた。



(a) フィルタリアクトル 1.5 mH



(b) フィルタリアクトル 5 mH

図 3 双方向直流電源の応答特性

(2) 提案する解析手法の妥当性を評価するために、図 4 に示す実験回路を用いて HILS の動作確認を行った。回路定数を表 2 に示す。実験システムは、商用系統から双方向整流器、電圧バランスを介した直流三線式配電線に、3 つの住戸が接続されているものとする。各住戸には、直流電源と直流電子負荷装置（定電力モードで使用）がそれぞれ接続されている。直流電源はガスエンジンコージェネレーション (GC) を模擬しており、直流出力 400 V から ± 170 V の直流配電線と接続するため、インターフェースとなる DC/DC コンバータが必要となる。本回路は、中性線に対して対称となるように構成し、制御は定電力制御を行なっている。また、GC を直流電源で模擬

することの妥当性については、本システムの運用法のもとでは問題ないことをガスエンジン実機の実験結果により確認している。

ここで、実機の 3 住戸モデルを用いた場合の実験結果と、リアルタイムシミュレータによって 3 つの実機モデルのうち 1 住戸を模擬し、2 住戸を接続した場合の実験結果を比較することにより、本研究における HILS の妥当性について検証を行った。

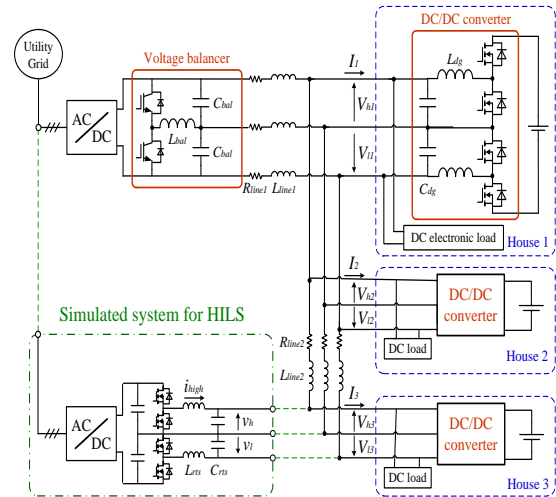


図 4 実験回路

表 2 主な回路定数

L_{bal}	5 mH	R_{line1}	0.5 Ω	R_{line2}	1 Ω	L_{ag}	5 mH	L_{rec}	5 mH
C_{bal}	4700 μ F	L_{line1}	30 μ H	L_{line2}	30 μ H	C_{ag}	220 μ F	C_{rec}	4.7 μ F

① 実機モデルのみを用いた解析

発電機の起動時について実験を行った。各住戸における発電機、負荷の実験条件を表 3 に示す。住戸 3 において分散形電源が停止状態から約 1 秒かけて 800 W を出力させた場合の結果を図 5 に示す (+170 V ~ 中性線間を Positive Side, 中性線 ~ -170 V 間を Negative Side と呼ぶ)。また、直流配電電圧の指令値に対する数 V の誤差は、変換器のセンサなどの検出誤差によるものである。実験結果より、住戸 3 の分散形電源出力の上昇に合わせて整流器の入力電流が減少しており、整流器から住戸までの線路抵抗、インダクタンスによる電圧降下の低減により直流配電線電圧がわずかに上昇している。しかし、分散形電源の起動の前後においてシステムは安定に動作しており、負荷への電力供給

表 3 各住戸の実験条件

	House1		House2		House3	
	load (W)	generation (W)	load (W)	generation (W)	load (W)	generation (W)
generate power	1000	1000	800	0	1000	0 \rightarrow 800

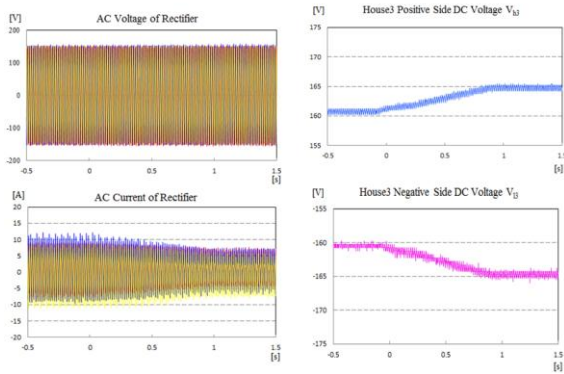


図5 実験結果（実機のみ）

も問題なく行われることが確認できた。

② リアルタイムシミュレータを用いた解析 DC マイクログリッド実験システムにおける HILS の動作確認を行うため、製作した双方向直流電源を用いてリアルタイムシミュレータと実機モデルの接続を行った。分散形電源の模擬は、処理速度の制約から本研究では変換器のスイッチングまでは考慮せず制御電流源で模擬する。直流負荷については純抵抗を用い、2つの電圧源が直流配電線に相当する。また、リアルタイムシミュレータの計算刻みは 60 μ s とした。図5に示す回路において実機モデルの住戸3を切り離し、インターフェースとなる DC/DC コンバータ及び双方向直流電源装置を介して、リアルタイムシミュレータにより住戸3の模擬を行った。前述の実験条件同様、発電機の起動時について実験を行った。実験結果を図6に示す。実験結果より、リアルタイムシミュレータによる仮想モデルを用いた実験システムにおいても、直流配電電圧の一定制御、各住戸への電力供給など問題なく行われることが確認できた。また、実機のみを用いた実験結果と比較すると、分散形電源起動の前後における整流器入力電圧、電流、及び直流配電電圧の挙動はほぼ一致していることが確認できる。これより、リアルタイムシミュレータ及

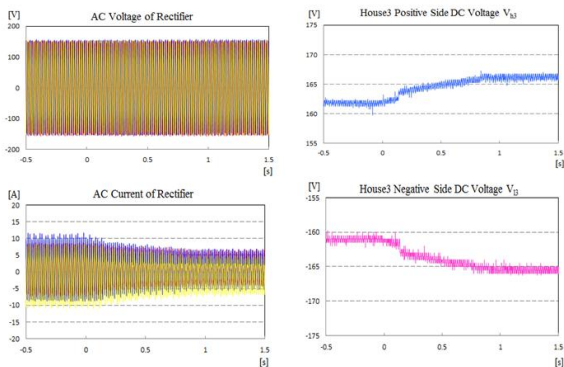


図6 実験結果（HILS）

び直流電源装置を用いて模擬住戸のモデリングが問題なく行われていることが分かった。

(3) 3住戸を模擬した実験用ミニモデルに加えて、2住戸、7住戸を HILS による提案手法で模擬することで、それぞれ 5住戸、10住戸の DC マイクログリッドを解析可能なシステムを構築した。汎用の回路シミュレータ (PS-CAD) を用いた結果と比較することでその妥当性を確認した。

また、100住戸を想定した直流配電システムの安定性について検討を行い、不安定を引き起こす負荷や線路抵抗値の条件をシミュレーションにより求め、100住戸を想定した直流マイクログリッドを構築した HILS による解析システムで模擬できることを示した。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 21 件）

- ① 平岩琢也, 藤原弘, 柿ヶ野浩明, 三浦友史, 伊瀬敏史, 直流マイクログリッドのリアルタイムシミュレーション, 電気学会半導体電力変換研究会資料, 査読無, SPC-12-4, 2011
- ② 平岩琢也, 柿ヶ野浩明, 三浦友史, 伊瀬敏史, 直流マイクログリッドの実時間模擬装置のための高速応答双方向直流電源の検討, 平成 23 年電気学会産業応用部門大会論文集, 査読無, 1-13, 2011
- ③ 藤原弘, 柿ヶ野浩明, 三浦友史, 伊瀬敏史, 直流マイクログリッドの実時間模擬装置のためのシステムのモデリングに関する研究, 平成 23 年電気学会産業応用部門大会論文集, 査読無, 1-12, 2011

〔学会発表〕（計 0 件）

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柿ヶ野 浩明 (KAKIGANO HIROAKI)

大阪大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：30437371